

УДК 521.1

## ПЛОТНОСТЬ И ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СКОРОСТЯМ ДЛЯ СВОБОДНО РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ МАТЕРИИ

А. М. Игнатов<sup>1,2</sup>, С. А. Тригер<sup>3</sup>

*Для системы невзаимодействующих частиц, первоначально находящихся в сферическом объеме заданного радиуса, рассмотрена эволюция плотности и функция распределения для различных начальных условий. В частности, установлены условия, при которых плотность при свободном расширении шарообразного облака невзаимодействующих между собой частиц остается пространственно постоянной, а граница резкой. Рассмотрены альтернативные варианты свободного сферически-симметричного расширения облака частиц. Результаты проведенного рассмотрения применимы для различных задач о центрально-симметричном взрыве, а также имеют астрофизические приложения.*

**Ключевые слова:** барионная симметрия Вселенной, антигравитация частиц и античастиц, темная энергия, закон Хаббла, разлет материи.

*Введение.* Проблема разлета газового шара в пустоту хорошо известна и имеет большое прикладное значение как в астрофизических, так и в лабораторных условиях (см. [1–4]). Как известно, силы, связанные с давлением, не позволяют рассматривать эту задачу как полностью автомодельную, хотя автомодельный режим достигается асимптотически на больших временах. В последнее время проблема сферически-симметричного разлета приобрела актуальность в связи с приложением ее к космологическим моделям эволюции.

Хотя  $\Lambda$  –  $CDM$  – стандартная модель Большого взрыва (Big Bang – BB) – выглядит формально весьма успешной, однако она включает два доминирующих, неизвестных и

<sup>1</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: aign@fpl.gpi.ru.

<sup>2</sup> Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, 117997 Россия, Москва, ул. Островитянова, 1.

<sup>3</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

напрямую невидимых компонента – Темную материю (ТМ) и Темную энергию (ТЭ), составляющих более 95 процентов вещества Вселенной. Кроме того эта модель нуждается в принятии гипотезы о начальной стадии эволюции – гиперинфляции, чтобы удовлетворить имеющимся экспериментально наблюдаемым космологическим данным, включая исключительную плоскостность Вселенной на больших масштабах (в том числе и на ранних стадиях ее эволюции после Большого взрыва) и недавно открытое ускоренное расширение Вселенной на больших масштабах.

Малость значения космологической константы Эйнштейна  $\Lambda$  в  $\Lambda - CDM$  модели гипотетически ассоциируется с внутренней энергией плотности вакуума, действующей как отталкивающая темная энергия, имеющая неизвестную и спорную физическую природу. Принимая во внимание эту неудовлетворительную ситуацию с отталкивательной ТЭ и притягивающей ТМ, некоторые авторы приходят к нетрадиционной гипотезе симметричной по веществу–антивеществу космологии. В этой модели предполагается, что материя и антиматерия после ВВ всегда присутствовали во Вселенной в равных количествах, гравитационно отталкиваясь друг от друга и выживая, несмотря на наличие аннигиляционных процессов на ранних стадиях. Гравитационно-симметричная материя, оставшаяся после аннигиляционных процессов, существует в рассматриваемой модели в виде в целом гравитационно-нейтральной Вселенной, в которой гравитационная нейтральность с равной нулю суммарной гравитационной массой и, следовательно, плоскостность обеспечивается на больших масштабах ( $\geq (2 \div 5)$  Мпс). Антиматерия (имеющая, как и материя, положительную инерционную массу) предполагается имеющей отрицательную гравитационную массу (или отрицательный “гравитационный заряд”, подобно противоположным электрическим зарядам в плазме). Наличие двух типов гравитационных зарядов имеет место для всех частиц–античастиц, например, нейтронов–антинейтронов, электронов–позитронов, протонов–антипротонов и т.д., а также для атомов и антиатомов. Первая дискуссия, связанная с такой гипотезой для электронов и позитронов, содержалась в работе Л. Шиффа [5] (см. также ссылки там). Позднее различные аспекты этой идеи, включая ее критику, обсуждались, в частности, в [6, 7].

Некоторые существенные особенности симметричной космологии (подобной, например, космологии Дирака–Милне), включающие антигравитацию вместо космологической константы, были недавно рассмотрены (см. [8–10] и ссылки там). Авторами [10, 11] показано как принцип эквивалентности (исторически сформулированный для притягивательной материи) может быть непротиворечиво расширен для модели с оттал-

квивательным гравитационным взаимодействием материи и антиматерии. Авторы [9] подчеркивают серьезную мотивацию для детального изучения космологии, подобной космологии Дирака–Милне, поскольку при этом “...решаются две главных проблемы стандартной космологии без включения дополнительных ингредиентов – темной энергии и гиперинфляции”.

Начальное разделение гравитационно отталкивающихся материи и антиматерии во Вселенной Дирака–Милне могло начаться в очень раннюю космологическую эпоху кварк-глюонной плазмы. Согласно модели Дирака–Милне, переход от кварк-глюонной плазмы к электрон-барионной плазме соответствовал примерному возрасту Вселенной  $6 \cdot 10^5$  сек [11], в отличие от времени  $\simeq 1$  сек в  $\Lambda - CDM$  модели. Огромные расстояния  $L \simeq 7$  крс или даже большие по некоторым оценкам, разделяющие гравитационно отталкивающиеся кластеры материи и антиматерии, полностью исключают их аннигиляцию в настоящее космологическое время. Наличие материи и антиматерии в симметричной модели Вселенной, но без антигравитации, дает оценку расстояния между кластерами материи и антиматерии порядка размера Вселенной. В противном случае аннигиляция этих кластеров должна генерировать диффузное гамма-излучение, что противоречит наблюдаемым данным [11].

Недавно точными астрономическими наблюдениями было открыто ускоренное расширение Вселенной [12, 13]. Это открытие свидетельствует в пользу гипотезы антигравитации материи и антиматерии, так же как объясняемые этой гипотезой барионная симметрия Вселенной, наблюдаемая высокая степень плоскостности и особенности джинсовской неустойчивости [14]. Вместе с тем два основополагающих наблюдаемых явления – закон Хаббла и реликтовое излучение – требуют своего объяснения в рамках рассматриваемой гипотезы.

Настоящая статья посвящена изучению разлета гравитационно-нейтрального вещества на гидродинамическом и кинетическом уровне. В отличие от модели Дирака–Милне [9], построенной на общей теории относительности, нами исследуется чисто классическая ньютоновская модель разлета, применимая для гравитационно нейтральной Вселенной (ГНВ) на больших масштабах. Возможность пренебрежения поправками ОТО на больших космологических масштабах была показана для обычной космологии еще Альфвеном [15]. Тем более это справедливо для ГНВ. При решении задачи о свободном разлете в космологии необходимым требованием является наблюдаемое сохранение однородности плотности вещества при разлете.

*Гидродинамика расширения с пространственно-однородной плотностью.* Рассмотрим прежде всего уравнение непрерывности. Для сферически-симметричного случая оно записывается в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nV_r)}{\partial r} + \frac{2nV_r}{r} = 0. \quad (1)$$

Имея в виду космологические применения в модели ГНВ, предположим теперь  $V_r = H(t)r$ . Это приводит к уравнению

$$\frac{\partial n}{\partial t} + H(t)\frac{\partial(nr)}{\partial r} + 2nH(t) = 0. \quad (2)$$

Будем считать, что плотность частиц  $n(\mathbf{r}, t) = n(t)$  в процессе расширения сохраняется однородной и зависит только от времени. Это означает, что частицы однородно заполняют расширяющийся шар радиуса  $R(t)$ . В рассматриваемом случае полное число частиц (имитирующее в модели ГНВ полное число кластеров) сохраняется. В модели ГНВ это соответствует времени  $t \geq t_0$ , где  $t_0 > 400$  тыс. лет, что отвечает примерному времени эволюции после ВВ до отрыва излучения от вещества и начала кластеризации материи и антиматерии

$$N = \int_0^{R(t)} n(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = \frac{4\pi R^3(t)n(t)}{3}, \quad \text{или} \quad n(t) = \frac{3N}{4\pi R^3(t)}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что  $n$  не зависит от  $r$ , получаем уравнение для изменения во времени радиуса шара-Вселенной  $R(t)$

$$\frac{\partial R(t)}{\partial t} = H(t)R(t). \quad (4)$$

Решения для  $R(t)$  и  $n(t)$  имеют вид

$$\begin{aligned} R(t) &= R(t = t_0) \exp\left(\int_{t_0}^t H(t) dt\right), \\ n(t) &= n(t = t_0) \exp\left(-3 \int_{t_0}^t H(t) dt\right), \\ n(t = t_0) &= \frac{3N}{4\pi R^3(t = t_0)}. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом скорость границы шара равна

$$V_R(t) = H(t)R(t = t_0) \exp\left(\int_{t_0}^t H(t) dt\right). \quad (6)$$

В общей задаче расширения с однородной плотностью можно рассматривать различные зависимости  $H(t)$ . Если считать, например, что  $H(t) = a/t$  находим

$$R(t) = R(t = t_0) \left[ \frac{t}{t_0} \right]^a. \quad (7)$$

Рассмотрим случай  $a = 1$  ( $H(t) = 1/t$ ), соответствующий свободному разлету. Для радиуса, скорости границы и плотности находим

$$\begin{aligned} R(t) &= R(t = t_0) \frac{t}{t_0}, \\ V_R(t) &= \frac{R(t = t_0)}{t_0} = \text{const} \equiv V_R; \\ n(t) &= \frac{3Nt_0^3}{4\pi R^3(t = t_0)t^3} = \frac{3N}{4\pi V_R^3 t^3}, \quad t > t_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Скорость на расстоянии  $r$  от центра шара в момент  $t$  в рассматриваемом случае равна  $V_r = r/t$ , что отвечает свободному расширению.

Для случая  $H(t) = H_0$  плотность спадает во времени экспоненциально.

Обратимся теперь к уравнению движения

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

Предполагая выполнение использованного выше соотношения  $V_r = H(t)r$ , получаем уравнение

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} + H^2(t) = 0 \quad (10)$$

очевидное решение которого имеет вид

$$H(t) = \frac{1}{t}; \quad t > t_0. \quad (11)$$

В применении к задаче о расширении в модели ГНВ эта зависимость означает, что современный возраст Вселенной  $T = (t - t_0)$ , где  $t$  – это текущее время. При этом предполагается, что нам неизвестна картина эволюции при  $t < t_0$ . При  $t_0 \ll t$  величина  $T \simeq 1/H(t)$ , что соответствует закону Хаббла. Поскольку в соответствии с современными данными величина константы Хаббла  $H(t) \simeq 67.8 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1} \text{ М}\cdot\text{с}^{-1}$ , то возраст вселенной равен примерно  $T = (13, 798 \pm 0, 037) \cdot 10^9$  лет.

*Кинетическое рассмотрение свободного расширения в случае сферической симметрии.* Чтобы найти условия реализации полученного выше гидродинамического решения и получить более общие решения, рассмотрим теперь кинетическое уравнение

$$\frac{\partial f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})}{\partial \mathbf{r}} = 0. \quad (12)$$

В общем случае в сферических координатах ( $\mathbf{r} = (x, y, z)$ , где  $x = r \sin \theta \cos \phi$ ,  $y = r \sin \theta \sin \phi$ ,  $z = r \cos \theta$ ) вектор скорости разлагается по базису, состоящему из трех единичных векторов с декартовыми координатами  $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$ ,  $\mathbf{e}_\theta = \partial \mathbf{e}_r / \partial \theta$ ,  $\mathbf{e}_\phi = \mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_\theta$ . В случае сферически-симметричного взрыва функция распределения ищется в виде  $f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v}) = f(t, r, v_r) \delta(v_\theta) \delta(v_\phi)$ , где  $v_\alpha = \mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{v}$  ( $\alpha = r, \theta, \phi$ ). Интегрирование по  $v_\theta, v_\phi$  уравнения (12) дает

$$\frac{\partial f(t, r, v_r)}{\partial t} + v_r \frac{\partial f(t, r, v_r)}{\partial r} + \frac{2v_r}{r} f(t, r, v_r) = 0. \quad (13)$$

Если еще сузить класс решений и искать решение (13) в виде

$$f(t, r, v_r) = n(t, r) \delta(v_r - V(t, r)), \quad (14)$$

то получаются уравнения гидродинамики (1), (9) и, с учетом требования однородности плотности, решение (8).

Общее решение (13) имеет вид

$$f(t, r, v) = \frac{1}{r^2} F(r - tv, v), \quad (15)$$

где  $F(r, v)$  — произвольная функция. Решение вида (14) получится, если выбрать произвольную функцию в виде

$$F(r, v) = n_0 t_0^3 v^2 \theta(V_0^2 - v^2) \delta(r), \quad (16)$$

где  $V_0 = R_0/t_0$ .

На качественном уровне учесть начальный тепловой разброс в решении (8) можно, если заменить  $\delta$ -функцию в (16) на гладкую функцию, например,  $\delta(r) \rightarrow \phi(r) = \Delta r / \pi 1/(r^2 + \Delta r^2)$ , тогда

$$f(t, r, v) = \frac{n_0 t_0^3 v^2}{r^2} \theta(V_0^2 - v^2) \phi(r - tv). \quad (17)$$

При помощи (17) легко вычислить все моменты функции распределения. Поскольку результат оказывается довольно громоздким, приведем асимптотики первых двух моментов

$$n(t, r) \sim \begin{cases} \frac{1}{r^4}, & r \rightarrow \infty \\ \frac{1}{r^2}, & r \rightarrow 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$V(t, r) \sim \begin{cases} \frac{1}{r}, & r \rightarrow \infty \\ r, & r \rightarrow 0. \end{cases}$$

Сингулярность плотности при  $r = 0$  возникает из-за фокусировки частиц с  $v_r < 0$ . При малых  $\Delta r$  скачок плотности немного размывается и распространяется со скоростью  $V_0$ . Характерные распределения плотности и скорости  $\Delta r t_0 / V_0 = 0.02$  показаны на рис. 1 и рис. 2.

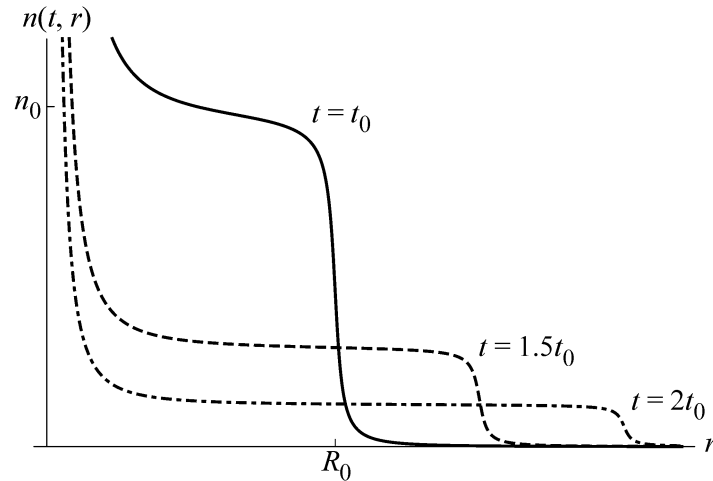


Рис. 1: Распределение плотности в различные моменты времени.

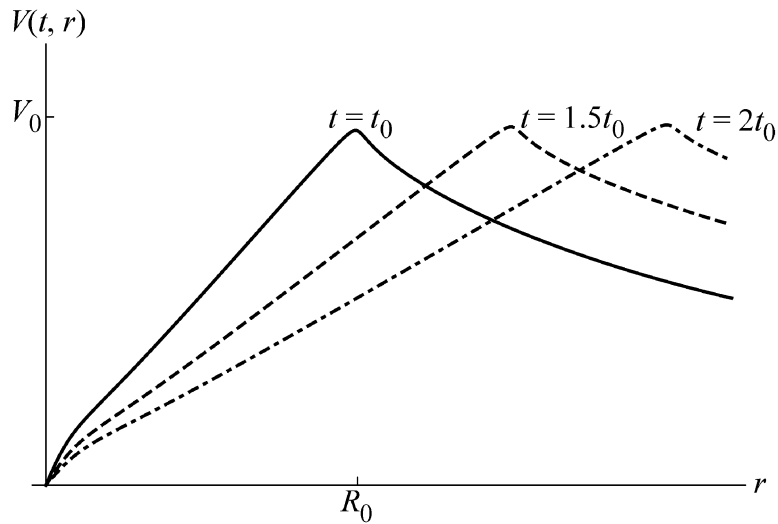


Рис. 2: Распределение скорости в различные моменты времени.

*Выводы.* Гипотеза о гравитационном отталкивании элементарных частиц и античастиц может привести к образованию в процессе эволюции Вселенной массивных кластеров противоположного “гравитационного заряда”. Наблюдаемая высокая степень “плос-

костности” Вселенной на больших масштабах позволяет применять ньютоновскую механику к процессам, развивающимся на таких масштабах.

Предполагая выполненным условие начальной однородности частиц и античастиц и глобальную гравитационную нейтральность Вселенной (обеспеченную в рассматриваемой модели симметрией частиц и античастиц на всех этапах эволюции), нами найдены гидродинамические и кинетические решения для сферически-симметричного свободного расширения вещества в нерелятивистском описании. Эти решения могут быть применимы и при рассмотрении процессов взрыва в земных или космических условиях.

Необходимо отметить, что первые эксперименты по обнаружению антигравитации частиц и античастиц (путем сравнения поведения водорода и антиводорода в поле Земли) предполагается провести в CERN в конце 2016 – начале 2017 годов (ALPHA [16], AEGIS [17] и GBAR [18]).

Эта работа поддержана Российским научным фондом (грант 14-50-00124). Авторы благодарны Ю.А. Грибову, А.И. Ершковичу, А.А. Рухадзе и П. Шраму (P.P.J.M. Schram) за полезные обсуждения.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Я. Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Москва, Наука, 1966).
- [2] К. П. Станюкович, *Неустановившиеся движения сплошной среды* (Москва, Гостехиздат, 1955).
- [3] L. Tinti, Anisotropic matching principle for the hydrodynamics expansion, arXiv:1506.07164 v1 (2015).
- [4] J. Peralta-Ramos and E. Calzetta, Phys. Rev. **D 87**, 034003 (2013).
- [5] L. I. Schiff, Phys. Rev. Lett. **1**, 254 (1958).
- [6] R. W. Brown and F. W. Stecker, Phys. Rev. Lett. **43**, 315 (1979).
- [7] J. M. Ripalda, On the possibility of repulsive gravitational interaction between matter and antimatter, arXiv:gr-qc/9906012v14 (2001).
- [8] G. G. Chardin and J.-M. Rax, Phys. Lett. **B 282**, 256 (1992).
- [9] A. Benoit-Levy and G. Chardin, Astronomy and Astrophysics **537**, 1 (2012).
- [10] С. А. Тригер, Ю. А. Грибов, А. А. Рухадзе, Инженерная физика **9**, 22 (2015).



- [11] A. G. Cohen, A. de Rujula and S.L. Glashow, *The Astrophysical Journal* **495**, 539 (1998).
- [12] S. Perlmutter et al., *The Astrophysical Journal* **517**(2), 565 (1999).
- [13] A. G. Riess et al., *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998).
- [14] S. A. Trigger and I. A. Gribov, *Jeans instability and antiscreening in the system of matter-antimatter with antigravitation*, *J. Phys. Conf. Series* (in print, 2015).
- [15] H. Alfvén, *Cosmology: J. Astrophys. Astr.* **5**, 79 (1984).
- [16] G. B. Andresen et al., *Nature Physics* **7**, 55 (2011).
- [17] S. Aghion et al., (AEgIS Collaboration) *Prospects for measuring the gravitational free-fall of antihydrogen with emulsion detectors*, arXiv:1306.5602v1 (2013).
- [18] G. Chardin et al., *Preprint: CERN-SPSC-2011-029 / SPSC-P-342* (2011).

Поступила в редакцию 12 ноября 2015 г.